



## 半導体集積回路の配線工程を応用した容量型MEMS技術に関する研究

著者	山? 宏明
雑誌名	東北大学電通談話会記録
巻	88
号	2
ページ	100-103
発行年	2020-03-19
URL	<a href="http://hdl.handle.net/10097/00127919">http://hdl.handle.net/10097/00127919</a>

博士学位論文要約（令和元年 9 月）

## 半導体集積回路の配線工程を応用した容量型 MEMS 技術に関する研究

山崎 宏明

指導教員：須川 成利

A Study on Capacitive MEMS Device Technologies  
Using Interconnect Process of Semiconductor Integrated Circuit

Hiroaki YAMAZAKI

Supervisor: Shigetoshi SUGAWA

This thesis reports on a study on high-performance capacitive micro electro-mechanical systems (MEMS) device technologies using the interconnect process of semiconductor integrated circuit. Firstly, considering that the RF-MEMS tunable capacitor is applied to transmission applications, I propose the RF-MEMS tunable capacitor with a quadruple series capacitor (QSC) to solve the issue of power handling. As a result of high-frequency measurement, the power handling of +44 dBm for cold switching were obtained. Moreover, the fabricated device exhibited the minimum and maximum capacitance values of 1.15 and 5.15 pF, respectively. In addition, the Q value was very high, i.e.,  $\geq 100$  at 1 GHz for all capacitance values. Secondly, to overcome the trade-off between power consumption and response time in conventional hydrogen sensors, I propose a capacitive MEMS hydrogen sensor that has a reverse T-shaped electrode structure and Pd-based metallic glass. The fabricated sensor achieved both fast response of 2.1 sec and low-power consumption of 0.2 mW.

## 1. はじめに

MEMS (Micro electro mechanical systems) は、半導体の微細加工技術を応用して形成される機械要素を含むデバイスもしくはシステムであり、様々なセンサーやアクチュエーターとして機能し、数多くが実用化されている。近年、IoT (Internet of things) や CPS (Cyber-physical system) の普及に向け、センシング及び通信技術の重要性が益々高まっており、その観点から MEMS 技術の更なる発展が期待されている。中でも容量型 MEMS は様々な応用がなされている重要な基盤技術の一つであるが、従来提案されている有機犠牲層を用いた製造プロセスにおいて、製造した素子の容量値ばらつきが大きいことが実用上の課題の一つであった。また、一般に「One MEMS, One Process」と言われるように、MEMS は製品ごとに製造プロセスが異なることが多く、少量多品種である MEMS にとって製造技術上の課題となっていた。本研究ではこれらの課題に対して、半導体集積回路の配線工程を応用し、従来の製造プロセスの課題であった容量値ばらつきを低減するプロセス技術を提案、実証する。更に提案されたプロセス技術を基盤として製造工程の共通化を検討し、高い付加価値を持つ高耐電力・高 Q 値 RF-MEMS 可変容量及び高速応答・低消費電力容量型 MEMS 水素センサーを製造し、それらの有用性を実証することを目的とする。

## 2. RF-MEMS 可変容量の容量ばらつき低減技術

スマートフォンを始めとした無線システムは周波数帯域の拡大が進んでおり、その結果として無線回路の設計は複雑化を続けている。その観点からマルチバンド・マルチモードシステムやリコンフィギュラブル RF システムなどが研究され、数多く報告されている [1]。これらのシステムにおいて可変容量素子は重要な部品である。容量値を可変することで周波数特性が変わり、一つの部品で数多くの帯域をカバーできるようになるため、システムのスリム化及び小型化に寄与することができる。RF-MEMS 可変容量は RF 信号線を低抵抗のメタルで形成することができるため、高い Q 値や線形性が実現可能であり、他方式の可変容量よりも優位性を持つ技術である。図 1 に静電駆動型 RF-MEMS 可変容量の動作原理を示す。RF-MEMS 可変容量は基板に固定された電極（固定電極）と、機械的なバネ構造に接続され可動する電極（可動電極）からなり、固定電極上には絶縁膜が形成されている。固定電極と可動電極間は空洞（エアギャップ）となっており、静電容量が形成されている。電極間に電圧を印可することにより、静電引力が発生し可動電極が下方に移動することで容量値が変化する。RF-MEMS 可変容量は半導体集積回路の配線工程を応用し、有機犠牲層を適用することで形成可能であることが報告されている。しかし、従来提案されているプロセスでは down state で容量値 ( $C_{down}$ ) のばらつきが大きいことが課題であ

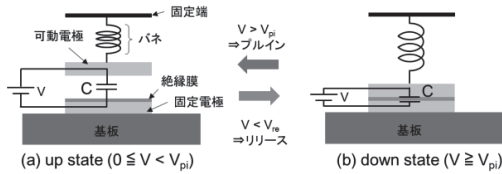
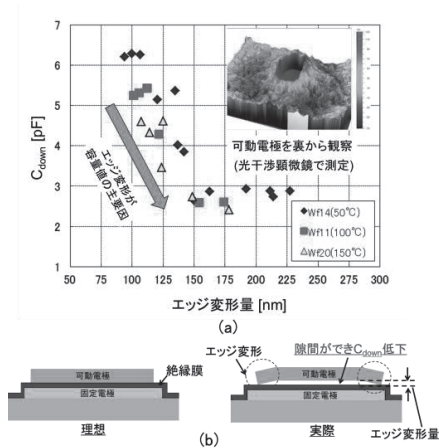


図1 RF-MEMS 可変容量の動作原理

った。そこで本研究では  $C_{\text{down}}$  ばらつきの原因究明を行い、ばらつきを抑制する構造及び製造プロセスを提案する。はじめに、 $C_{\text{down}}$  ばらつきの要因分析及び構造解析を行い、図2に示すように可動電極裏面端に発生していたエッジ変形が主要因であることを明らかにした。

図2 (a)  $C_{\text{down}}$  とエッジ変形量の相関。 (b) down state における断面イメージ。

次に、エッジ変形を回避するため、全ての可動電極エッジに対して固定電極が内側に配置された可動電極オーバーラップ構造を考案した。しかし、従来の製造プロセスを本構造に適用した場合、犠牲層上部が固定電極による段差形状をトレースした形状となるため、犠牲層上に形成される可動電極が湾曲してしまう問題が発生する懸念がある。この問題を解決するため、図3に示すように下部電極形成後に Si 酸化物で埋め込みを行い、CMP (Chemical mechanical polishing) による Si 酸化物の平坦化プロセスを適用することで下部電極の段差をなくし、更にエッチバックによるリセスプロセスによりエッジ変形を吸収可能な微小な段差を形成する CMRE (Chemical mechanical polishing & recess etching) プロセスを提案した。提案プロセスを適用した結果、従来プロセスでは犠牲層による湾曲は約 270 nm であったが、本プロセスでは約 80 nm に低減可能であることが明ら

かになった。本プロセスを適用した RF-MEMS 可変容量を製造し、 $C_{\text{down}}$  を測定し比較したところ、図4に示すように、従来構造及びプロセスでは  $C_{\text{down}}$  の面内平均値が 1.15 pF、標準偏差は 0.36 pF であったのに対して、本提案である可動電極オーバーラップ構造及び CMRE プロセスを適用した場合においては同平均値が 1.90 pF、標準偏差は 0.096 pF となり、 $C_{\text{down}}$  の平均値が約 65% 増加し、更に容量値ばらつきが約 1/6 に低減することを実証した。

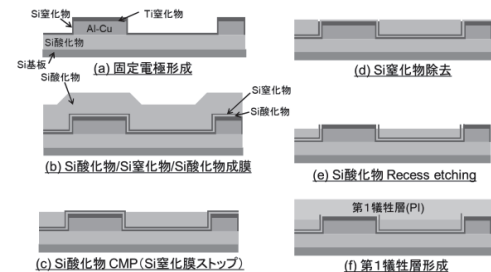
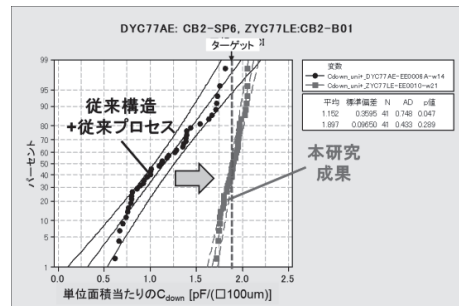


図3 提案する CMRE プロセスのフロー。可動電極形成以降のプロセスは省略。

図4 試作した素子の  $C_{\text{down}}$  の正規確率プロット。

### 3. 高い耐電力を実現する CMOS 混載 RF-MEMS 可変容量

RF-MEMS 可変容量を無線システムの送信部に適用する際には、送信用の大電力によってセルフアクチュエーションやホットスイッチング時のノンリリーシング不良が発生し、容量値制御が困難となることが大きな課題の一つであった。従来報告されている対策案では、機械構造の高剛性化によりプルイン電圧及びリリース電圧を増加させることで耐電力を向上させていたが、その結果、駆動電圧の増加及びそれによる消費電力の増加を引き起こしていた。本節ではこれらの課題を解決するため、プルイン電圧の増加を抑制しつつ耐電力を向上させる QSC (Quadruple series capacitor) 構造を有する RF-MEMS 可変容量を提案する。QSC 構造は図5に示すように、直列接続された二

つの MEMS 可変容量の両端に固定容量を直列接続した構造であり、MEMS 可変容量に印加される実効電圧を低減でき高剛性化を行うことなく耐電力の向上が可能である。

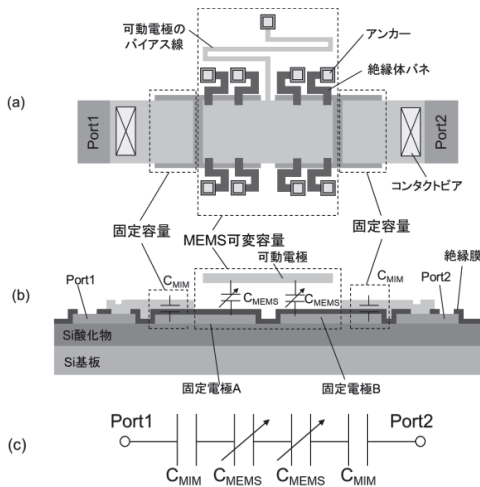


図 5 QSC 構造を有する RF-MEMS 可変容量. (a) 平面図. (b) 断面図. (c) 高周波帯での等価回路.

QSC 構造の RF-MEMS 可変容量素子を単位素子とした 4 ビットの変容量バンクを設計し、CMRE プロセスを適用した表面マシニングプロセスを用いて MEMS 素子を CMOS 技術による駆動制御回路基板上に混載した (図 6). チップサイズは  $2.55\text{ mm} \times 2.98\text{ mm}$  であり、チップ内のシリコン基板の厚さは  $350\text{ }\mu\text{m}$  である. 製造した CMOS 混載 RF-MEMS 可変容量バンクを測定した結果、 $+44\text{ dBm}$  の優れた耐電力を実現できることを確認した. また、高周波での容量値及び Q 値を測定し、 $1\text{ GHz}$  においてシヤント構成の可変容量で最小容量値  $1.15\text{ pF}$ 、最大容量値  $5.15\text{ pF}$  (可変比 4.5)、シリーズ構成で最小容量値  $0.25\text{ pF}$ 、最大容量値  $4.52\text{ pF}$  (可変比 18.1) が得られ、それぞれ容量値を CMOS 制御回路より 16 通りで可変できることを示した. Q 値は  $1\text{ GHz}$  で 100 以上、 $2\text{ GHz}$  で 60 以上と電氣的損失が非常に小さいことを

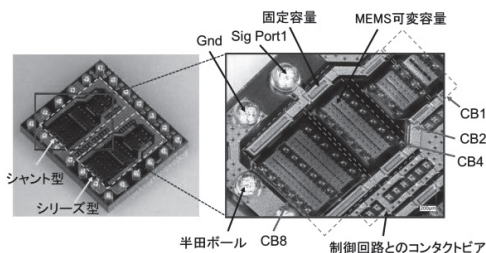


図 6 試作した CMOS 混載 RF-MEMS 可変容量

明らかにし、図 7 のように他方式と比較して、高い耐電力と Q 値が実現可能であることを実証した.

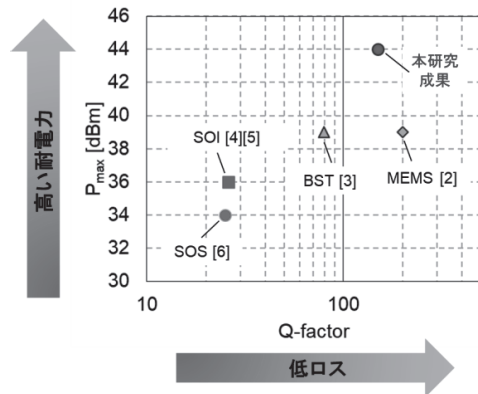


図 7 本研究成果と他方式との比較

#### 4. 高速応答・低消費電力を実現する容量型 MEMS 水素センサー

地球温暖化や SDGs の観点から、クリーンエネルギーとして水素が期待されている. しかし、水素は可燃性ガスであるため、漏洩検知センサーとして高速応答・低消費電力の水素センサーが求められていた. しかし、従来の水素センサーはセンシングのためにヒーターが必要であり、低消費電力化が困難であった. そこで本節では従来の水素センサーの課題であった低消費電力動作と応答時間のトレードオフを打破し、高速応答と低消費電力を両立する Pd 系金属ガラスと逆 T 型可動電極構造を適用した容量型 MEMS 水素センサーを提案する. 図 8 に断面イメージと動作原理を示す. 水素により Pd 系金属ガラスが膨張し、その結果メンブレンが変形することで容量値が変化し水素を検知する. この現象は常温下でも起こるためヒーターによる加熱が不要であり、更に容量型構造により DC 電流が流れないため、原理的に低消費電力動作が可能である.

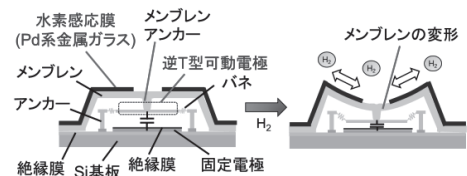


図 8 逆 T 型電極構造と Pd 系金属ガラスを有する容量型 MEMS 水素センサー.

感応膜の観点から純 Pd の問題点である低応答速度とヒステリシス発生の問題を打破するため、Pd 系金属ガラスの検討を行い、 $\text{Pd}_{78}\text{Cu}_5\text{Si}_{17}$  の組成においてヒステリシスフリーになることを分析結



果により確認した．同材料を感応膜として用いた容量型 MEMS 水素センサーを図 9 に示すように製造し，純 Pd を感応膜として使用したセンサーと比較した結果，応答時間が約 3 桁改善し 2.1 秒の高速応答を実現可能であることを明らかにした (図 10)．

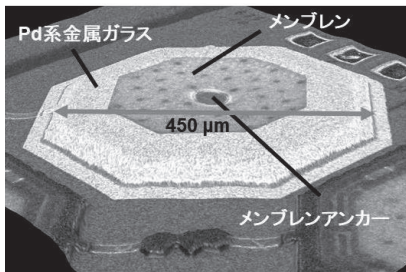


図 9 試作した容量型 MEMS 水素センサーの 3 次元顕微鏡像．

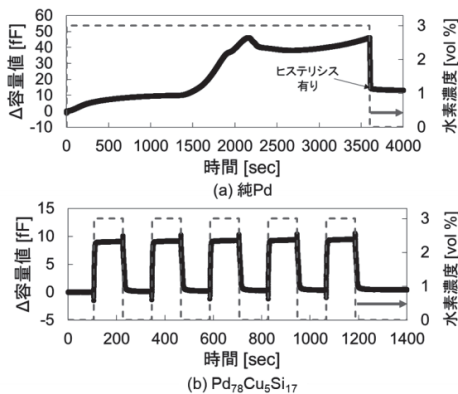


図 10 水素に対する応答波形．(a) 純 Pd．(b)  $\text{Pd}_{78}\text{Cu}_5\text{Si}_{17}$ ．

消費電力の観点では，本提案構造は容量型であり更に従来の水素センサーとは異なりセンシング時にヒーター加熱が不要である．そのため素子としては容量の充放電電流しか電力を消費せず，容量検出回路の消費電力が支配的になる．製造した水素センサーの感度より，市販されている容量検出回路を想定すると消費電力は約 0.2 mW と見積もられ，従来の水素センサーに対して約 1/1000 以下の低消費電力動作を実現可能であることを示した．その結果，図 11 に示すように本提案の容量型 MEMS 水素センサーは従来トレードオフであった高速応答と低消費電力を両立可能であることを実証した．また，前節までで検討した有機犠牲層を用いた表面マイクロロソニングプロセスを基盤として，水素センサーの製造プロセスの約 80% を RF-MEMS 可変容量の製造プロセスと

共通化できることを明らかにした．一般に MEMS はデバイスごとに大幅に製造プロセスが異なるケースが多いが，本提案のプロセスによって少ないプロセス変更によりこの制限を打破できる可能性を容量型 MEMS において示した．

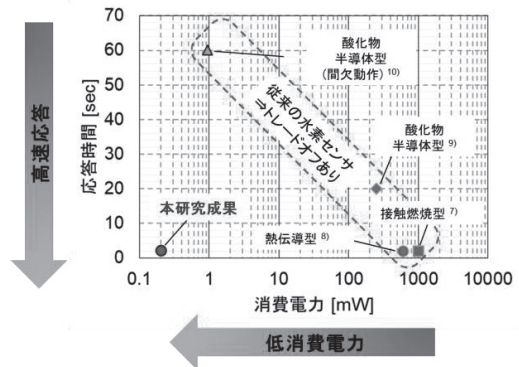


図 11 本研究結果と他方式との比較．

## 5. まとめ

本論文では半導体集積回路の配線工程を応用し，少量多品種な高機能 MEMS アプリケーション実現に資する容量型 MEMS 技術を創出するため，RF-MEMS 可変容量及び容量型水素センサーの研究を行った．それぞれ従来方式に対する優位性を実証し，一連の研究結果により CPS・IoT 社会の早期実現に向けた寄与が期待できると考えられる．

## 文献

- 1) G. M. Rebeiz, *RF MEMS: Theory, Design, and Technology*, Wiley-Interscience (2002).
- 2) Cavendish Kinetics, *Smarttune Antenna Tuners, 32CKxxxY Product Brief* (2015).
- 3) On Semiconductor, *TCP-3056H datasheet* (2013).
- 4) J. L. Hilbert, *Tunable RF Components and Circuits: Applications in Mobile Handsets (Devices, Circuits, and Systems)*, CRC Press, p.40 (2015).
- 5) RF Micro Devices Inc., *RFAC3612 datasheet* (2014).
- 6) Peregrine Semiconductor Corporation, *PE64904 datasheet* (2018).
- 7) FIS. Inc., *H2 Detection Module FH2-HY11 for Hydrogen Gas Leak Detection* (2015).
- 8) <https://www.ngkntk.co.jp/news/upload/20160314.pdf>.
- 9) 北口久雄，水素エネルギーシステム Vol. 30, No. 2, pp. 35-40 (2005).
- 10) FIS. Inc., *Innovation Japan* (2014).